Die Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante und des Hochfrequenzwiderstandes von festen Isolierstoffen.

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main.

Vorgelegt von
Franz Scheuer
aus Frankfurt a. M.
1936.

Referent: Prof. Dr. K. W. Meißner.

Tag der mündlichen Prüfung:
17. Februar 1936.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Mehrere Forscher[1]) finden bei der Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten (DK) und des dielektrischen Verlustes von Isolierstoffen ein oder mehrere Maxima oder Minima. Doch herrscht über die Lage und Form dieser Stellen keineswegs völlige Uebereinstimmung, ebensowenig über den Verlauf der DK überhaupt. Eine eingehende Untersuchung dieser Anomalien, die den Eindruck von Resonanzstellen irgendwelcher resonanzfähiger Gebilde der untersuchten Substanz erwecken können, z. B. über die Veränderung der obigen Maxima mit der Temperatur, schien geeignet, Aufschluß über den Mechanismus der dielektrischen Polarisation und über das Entstehen der Hochfrequenzverluste zu liefern.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, die von Herrn Geheimrat Wachsmuth und Herrn Dr. W. Graffunder angeregt wurde, war es daher, mit Hilfe einer Präzisionsmethode die Frequenzabhängigkeit der DK und der Dämpfung dieser Stoffe genauestens zu messen und Näheres über das Verhalten und die Lage dieser fraglichen Maxima bei verschiedenen Temperaturen festzustellen.

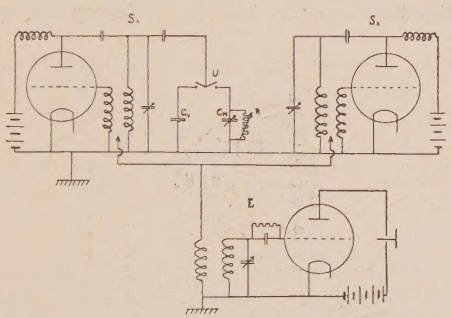

Fig. 1.

Prinzip der Methode.

Als empfindlichste und für die vorliegende Arbeit geeignetste Methode erschien die Schwebungsmethode, wie sie zuerst von G. Preuner und L. Pungs[2]) und J. Herweg[3]) angegeben und von W. Graffunder und R. Weber[4]) zur Untersuchung der Dämpfung ausgebaut wurde. Es sei hier nochmals kurz auf ihr Prinzip eingegangen. Zwei Röhrengeneratoren S_1 und S_2 (Fig. 1) erzeugen Schwingungen der Frequenzen ν_1 und ν_2. Liegt nun

1) H. Kühlewein, ZS. f. techn. Physik, **10**, 280, 1929.
R. Weber, ZS. f. Physik, **70**, 706, 1931.
2) G. Preuner u. L. Pungs, Physik.Z. **20**, 543, 1919.
3) J. Herweg, ZS. f. Physik, **3**, 36, 1920.
4) W. Graffunder u. R. Weber, ZS. f. Physik, **65**, 723, 1930.

die Differenz $\nu_1 - \nu_2$ der beiden sich überlagernden Schwingungen innerhalb des Hörbereiches, so wird man im Lautsprecher eines Empfängers diesen Schwebungston hören. Die Kapazitäten im Schwingungskreis des einen Senders, z. B. von S_1, kann man nun in zweifacher Ausführung ausbilden, nämlich

1. als einfachen Plattenkondensator C_v oder
2. als variablen Drehkondensator C_m,

an dem man die Größe der Kapazität oder ihre Aenderungen ablesen kann. Beide Kondensatoren können mit Hilfe eines Umschalters U wahlweise in den Schwingungskreis von S_1 eingeschaltet werden. Sind ihre Kapazitäten und ihre Verluste vollkommen gleich, so wird die bei einer bestimmten Frequenz des Senders S_1 vorgenommene Abgleichung genügen, um beim Uebergang zu anderen Wellenlängen gleich hohe Ueberlagerungstöne beim Umschalten von C_v auf C_m zu erhalten. Sind die Kondensatoren jedoch in ihrem Verhalten nicht identisch, was durch die Frequenzabhängigkeit der DK des Dielektrikums in C_v möglich ist, so wird beim Uebergang zu anderen Wellenlängen diese Uebereinstimmung nicht mehr vorhanden sein. Aus der Größe der bei C_m notwendigen Aenderung ermittelt man die Dispersion des Mediums im Kondensator C_v. Dabei ist aber noch folgendes zu berücksichtigen: Ein jedes Dielektrikum hat (z. B. durch Leitfähigkeit oder dielektrische Hysterese) mehr oder weniger Verluste, die frequenzabhängig sind. Es ist daher von Vorteil, sich für den Versuchskondensator ein Ersatzschaltbild zu schaffen. Ein solches Ersatzbild kann ein verlustfreier Kondensator C_m mit Parallelwiderstand, oder ein verlustfreier Kondensator C_m mit einem Widerstand W' in Serie sein. Die Zusammenstellung Kondensator mit parallel geschaltetem Widerstand hat den Vorteil, daß durch die Teilung des Stromes in Leitungs- und Verschiebungsstrom sofort die wirkliche DK aus der Kapazität C_m ermittelt werden kann. Aus diesem Grunde wurde dieser Anordnung der Vorzug gegeben. Die Größe des Parallelwiderstandes kann als Maß für die Dämpfung gelten.

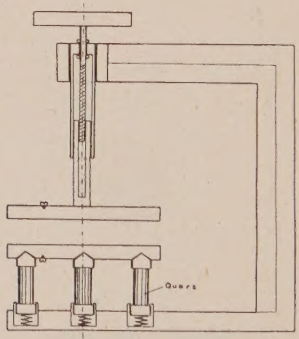

Fig. 2.

Versuchsanordnung.

Der Sender S_1 (vergl. Fig. 10) ist so aufgebaut und dimensioniert, daß man mit Hilfe eines Drehkondensators und 4 wahlweise einschaltbarer Spulen einen Wellenbereich von 150 m bis 2000 m bestreichen kann. Zur Schwingungserzeugung diente eine Röhre der Type RE 134. Beim Sender S_2 fielen die umschaltbaren Spulen weg und es war nur eine feste Spule vorhanden. Da der Sender außer der Grundschwingung noch mehrere Oberwellen erzeugte, war die Möglichkeit gegeben, dort, wo die Grundwelle nicht mehr ausreichte,

irgend eine Oberwelle zur Ueberlagerung heranzuziehen. Die Schwingungen wurden mit einem einfachen Empfänger, bestehend aus einer Audion- und einer Niederfrequenzstufe empfangen und ihre Intensitäten mit einem kapazitiv an den Schwingungskreis angekoppelten Röhrenvoltmeter kontrolliert.

Da das Gleichstromnetz des Institutes sehr starken Schwankungen unterworfen war, wurde als Stromquelle für die beiden Sender und das Röhrenvoltmeter eine besondere Akkumulatorenbatterie größerer Kapazität benutzt.

Um auch sehr kleine Aenderungen des Schwebungstones wahrzunehmen, wurden die Ueberlagerungsschwingungen im Niederfrequenzteil des Empfängers noch einmal mit einer konstanten Schwingung von der Frequenz 768 Hz überlagert. Diese Schwingung liefert eine elektromagnetisch erregte Stimmgabel. Man kann nun den Sender S_1 so einstellen, daß der Ueberlagerungston der beiden hochfrequenten Schwingungen bei eingeschaltetem Versuchskondensator C_v gerade 768 Hz hat. In diesem Falle wird man keine sogenannten sekundären Schwebungen mit dem Stimmgabelton wahrnehmen. Wird jedoch beim Umlegen des Schalters U_1 auf den Meßkondensator C_m die Frequenz ν_1 geändert, so wird man je nach dem Frequenzunterschied mehr oder weniger Schwebungen hören. Durch Veränderung des Meßkondensators C_m kann man wieder auf Schwebungsfreiheit einstellen.

Der Versuchskondensator C_v ist in Fig. 2 schematisch dargestellt. Die obere Platte, die mit einer Spindel auf und ab bewegt werden kann, ist mit der Erde verbunden, während die untere Platte durch drei Quarzröhrchen isoliert ist. Die Quarzröhrchen sind in die Unterlage federnd eingelassen, um

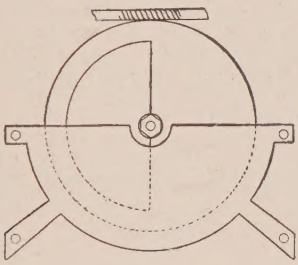

Fig. 3.

beim Zusammenpressen einen zu großen Druck auf die zu untersuchende Substanz zu vermeiden und um ein Klemmen der beiden Platten zu verhindern, falls die Versuchssubstanz nicht genau parallele Grenzflächen hat. In diesem Falle würde der Luftkeil, der sich zwischen den starr befestigten Platten befindet, die Meßresultate erheblich fälschen. Die Platten sind aus vernickeltem Messing gearbeitet, der kräftig ausgebildete Arm aus Leichtmetallguß mit T-förmigem Profil gewährleistet die nötige Stabilität.

Der Meßteil besteht aus zwei parallel geschalteten variablen Kondensatoren. Der eine der beiden dient zur Grobregulierung und ist ein hochwertiger Kurzwellendrehkondensator mit einem Minimum an Isoliermaterial und demzufolge einem Minimum an schädlichen dielektrischen Verlusten. Der zweite ist als Feinkondensator ausgebildet und in Fig. 3 gezeichnet. Die drehbare halbkreisförmige geerdete Platte ist auf einer runden Hartgummischeibe befestigt. Am Rande hat diese Scheibe eine Riffelung, in die ein Schneckentrieb eingreift, mit dessen Hilfe die Platte sehr langsam unter der auf vier Glasfüßen ruhenden nicht geerdeten Platte gedreht werden kann. Bei einem

Plattenabstand von etwa 7 mm kann auf diese Weise die Kapazität sehr fein und kontinuierlich verändert werden. Die Eichung dieses Kondensators ergab eine Aenderung der Kapazität von 0,0085 cm/Skt. Der ganze Kondensator hat einen Variationsbereich von etwa 0,9 cm.

Zur Vermeidung von Handkapazitäten sind alle empfindlichen Teile der Apparatur in geerdeten Blechkästen untergebracht. In die Blechkästen der beiden Sender ragt eine Antenne hinein, die die Aufgabe hat, die Schwingungen dem Empfänger zuzuführen. Um einzelne Substanzen auch bei höheren Temperaturen untersuchen zu können, befindet sich außerdem der Blechkasten mit dem Versuchskondensator in einem elektrisch bis auf etwa 100° heizbaren Thermostaten. An die Temperaturkonstanz wurden keine größeren Anforderungen gestellt, eine Konstanz von $\pm$ 0,5° C genügte vollkommen.

Der Ersatzwiderstand.

Der in dem Ersatzschaltbild für einen Kondensator mit dielektrischen Verlusten parallel zu dem Meßkondensator liegende Widerstand hat im Idealfalle bei jeder Frequenz und bei jedem Widerstandswert die gleiche Kapazität und Selbstinduktion. Einen solchen Widerstand, der zum Zwecke der Messung außerdem noch variabel sein muß, zu beschaffen, ist jedoch nicht möglich, und so muß der Teil der Apparatur, der aus Meßkondensator und Parallelwiderstand besteht (im folgenden kurz Meßteil genannt) verglichen werden mit einer Eichanordnung, in der parallel zu einem Luftkondensator ein Präzisionswiderstand liegt. Der Präzisionswiderstand muß aber folgende Bedingungen erfüllen: 1. er darf nur geringe Kapazität und Induktivität besitzen, 2. die Aenderungen seiner Induktivität und die daraus entstehende scheinbare Kapazitätsänderung infolge Skineffekt müssen sich rechnerisch genau bestimmen lassen. Solche Widerstände sind in bandförmigen Metallwiderständen

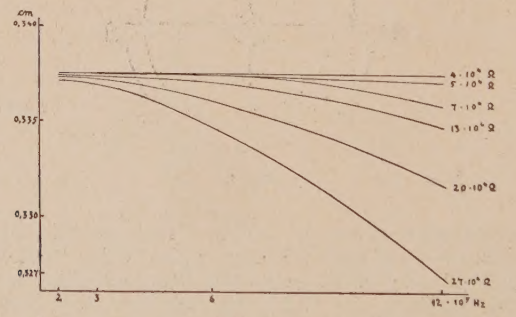

Fig. 4.

gegeben. Es wurden daher durch Kathodenzerstäubung gewonnene Widerstände benutzt, wie sie gemeinsam mit W. Graffunder[5]) hergestellt und berechnet worden waren. Fig. 4 zeigt die durch eine solche Berechnung erhaltenen Kurven. Für die Kapazitätsänderungen ist die Frequenz aufgetragen, als Ordinate die Kapazitätsänderung ΔC. Tabelle 1 gibt die errechneten Werte ihrem absoluten Betrage nach für einige Frequenzen an. Selbstverständlich ist auch der Widerstandswert von der Frequenz abhängig, jedoch sind die Abweichungen in dem fraglichen Gebiet so unbedeutend, daß sie vernachlässigt werden können. Die Berechnungen sind unter der Voraus-

[5]) W. Graffunder, Ann. d. Physik, **19**, 689, 1934.

setzung angesetzt, daß die Plättchen allseitig mit einer geerdeten Hülle im Abstand von 1 cm umgeben sind. Selbstverständlich muß auch die Versuchsanordnung den Ansätzen der Rechnung entsprechen, und so wurden die Plättchen dieser Forderung gemäß in ein entsprechend geformtes geerdetes Blechkästchen gebracht.

Tabelle 1.

λ m \ Ω	4.10^4	5.10^4	7.10^4	13.10^4	20.10^4	27.10^4
250	0.3374	0.3370	0.3358	0.3348	0.3316	0.3369
500	0.3375	0.3374	0.3374	0.3370	0.3360	0.3347
1000	0.3375	0.3375	0.3374	0.3372	0.3371	0.3368
1500	0.3375	0.3375	0.3375	0.3374	0.3373	0.3371

Als Dämpfungswiderstand für den Meßkondensator wurde zunächst ein Nernststift benutzt, der in einem kleinen elektrischen Ofen an seinen Zuleitungen (Pt-Draht) aufgehängt war. Durch verschieden starkes Heizen des Ofens konnte der Stift mehr oder weniger stark leitend gemacht werden. Das Bestechende an dieser Anordnung ist die Tatsache, daß man die Leitfähigkeit kontinuierlich variieren kann, ohne den Stift mittelbar oder unmittelbar berühren oder erschüttern zu müssen. Es stellte sich jedoch im Verlauf der Untersuchungen ein Nachteil dieser Anordnung heraus, der sie als vollkommen unbrauchbar erscheinen ließ. Es zeigte sich nämlich, daß die Kapazität des Widerstandes nach einer Erhitzung und der darauf folgenden Abkühlung nicht mehr den gleichen Wert aufwies wie vorher, sondern dabei zu immer kleineren Werten führte. Wie weit diese Aenderung geht, ob sie gelegentlich ihre Richtung wechselt oder bis zur Zerstörung des Materials in gleicher Richtung weiter verläuft, wurde nach der Feststellung der Unbrauchbarkeit nicht weiter untersucht. Die Ursache für dieses Verhalten dürfte in einem Zusammensintern oder aber in inneren chemischen Veränderungen der Substanz zu suchen sein.

An die Stelle des Nernststiftes wurde darauf ein variabler Flüssigkeitswiderstand gebracht (Fig. 5). Als Elektrolyt diente eine Kupfersulfatlösung;

Fig. 5.

die Elektroden bestanden aus Kupferdraht. Die Variierung des Widerstandes konnte dadurch bewirkt werden, daß der Querschnitt des die beiden Glasgefäße verbindenden Stückes Ventilschlauch veränderlich war. Dies wurde durch Zusammenpressen des letzteren mittels einer Spindel erreicht (siehe Fig. 5). Die Konzentration der Lösung war so gewählt, daß der Variationsbereich zwischen $1{,}5 \cdot 10^4$ und etwa 10^7 Ohm (d. h. praktisch unendlich) lag. Diese Anordnung lieferte gut reproduzierbare Werte.

Die Eichung.

Da es bei den Messungen der Frequenzabhängigkeit der DK und der Verluste in erster Linie auf relative Aenderungen und deren genaue Kenntnis ankommt, nehmen wir an, daß der luftgefüllte Versuchskondensator mit dem parallel geschalteten Präzisionswiderstand, abgesehen von der rechnerisch ermittelten Kapazitätsänderung ΔC des letzteren, vollkommen frequenzunab-

hängig ist. Man kann also diese Anordnung zur Eichung des Meßteiles benutzen.

Die Eichung geschah folgendermaßen: Bei einer Frequenz von 150 Khz wurde durch Regulieren des Meßkondensators auf sekundäre Schwebungsfreiheit eingestellt, während der Versuchskondensator mit Luft gefüllt war und keine Dämpfung durch einen Platinwiderstand besaß. Hierauf wurde Sender S_1 auf eine andere, höhere Frequenz gebracht und Sender S_2 und Empfänger für diese neue Frequenz in gleicher Weise eingestellt. Wurde nun auf den Meßteil umgeschaltet, so war eine Aenderung der Kapazität nötig, um wieder sekundäre Schwebungsfreiheit zu erhalten. Diese Aenderung wurde bestimmt, ähnlich verfuhr man für andere Frequenzen. Sämtliche Ablesungen ergaben eine Kurve. Nun wurde der Versuchskondensator mit einem Platinwiderstand gedämpft und auf gleiche Weise eine Messung vorgenommen, nur mit dem Unterschied, daß man vor der Kapazitätsregulierung zunächst am Flüssigkeitswiderstand auf gleichen Ausschlag des Röhrenvoltmeters, d. h. auf Amplitudengleichheit im Versuchs- und Meßteil einstellte. Bei der Aufzeichnung der Kurven fanden selbstredend die berechneten Korrektionskurven für die einzelnen Plättchen Berücksichtigung. Die Kurvenformen, die sich daraus ergaben, zeigten eine außerordentlich große Abweichung untereinander, sowohl für verschiedene Dämpfungswiderstände, als auch für verschiedene Kapazitätswerte von C_v. Diese Abweichungen können zweierlei Ursache haben: 1. die Unsymmetrie der Zuleitungen zu den beiden Kondensatoren täuscht bei verschiedenen Kapazitätswerten verschieden große Kapazitätsänderungen vor, 2. die Gestaltsänderung des Flüssigkeitswiderstandes ergibt bei verschieden starkem Zusammenpressen eine reelle Kapazitätsänderung. Diese Ursache ist jedoch im Vergleich zur ersten wesentlich geringer. Beide Effekte zusammen können aber unter Umständen größer sein, als die erwartete Aenderung der Kapazität infolge der Frequenzabhängigkeit der DK. Wie groß solche Aenderungen im Falle 1 sein können, zeigt ein einfacher rechnerischer Vergleich zwischen einem Kondensator C' mit Zuleitung ohne Selbstinduktion und einem Kondensator C, dessen Zuleitung eine Selbstinduktion L haben soll. Setzt man die komplexen Widerstände der beiden Seiten gleich, so erhält man:

$$\frac{1}{j\,\omega\,C'} = j\,\omega\,L + \frac{1}{j\,\omega\,C}$$

woraus sich für C' ergibt

$$C' = \frac{C}{1 - \omega^2 L\,C}$$

Es geht also in den Nenner der rechten Seite das Quadrat der Kreisfrequenz ein. Setzt man in die Gleichung für C' in der Praxis vorkommende Werte ein, z. B. C = 90 cm, L = 500 cm und $\omega_1 = 10^6\ \text{sec}^{-1}$, $\omega_2 = 10^7\ \text{sec}^{-1}$, so ergibt sich bei einer Kreisfrequenz $\omega_1 = 10^6$ für C' der Wert

$$C' = \frac{C}{0{,}99995}$$

während für $\omega_2 = 10^7\ \text{sec}^{-1}$ der Wert

$$C' = \frac{C}{0{,}995}$$

wird. Es sei hier noch kurz das Ergebnis der Rechnung für eine Anordnung (Fig. 6) gezeigt, die der benutzten sehr nahe kommt. Für L_1, L_2, L_3 wurde eine Induktivität der Zuleitungen von je 200 cm angenommen, für L_4, L_5, L_6 eine solche von 100 cm, ferner für $C_2 = 90$ cm und $R_1 = R_2 = 500\,000$ Ohm. Die Rechnung ergab nun, daß zur Berechnung des Effektes bei unsymme-

trischen Zuleitungen bei $\omega_2 = 10^7$ die Kapazität $C_1 = 89{,}820$ cm sein muß, während $\omega_1 = 10^6$ ein $C_1 = 89{,}982$ cm zur Gleichheit der beiden Kreise in bezug auf ihren komplexen Widerstand erforderlich ist. Es ist also ausschließlich der Unsymmetrie der Zuleitungen zuzuschreiben, daß beim Uebergang auf eine zehnmal höhere Frequenz der Kondensator C_1 um 0,162 cm kleiner werden muß, um bei sonst gleichen Bedingungen einen gleichen komplexen Widerstand der Anordnung zu erhalten. Wenn wir annehmen, der Kondensator

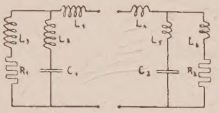

Fig. 6.

C_1 sei der Versuchskondensator, also nicht variierbar, so muß der variable Meßkondensator C_2 um den gleichen Betrag vergrößert werden. Diese Tatsache erfordert die Abgleichung der Selbstinduktionen der beiden Zuleitungen. Diese Abgleichung erfolgte durch Einfügen einer Kupferdrahtspirale von drei Windungen in die Zuleitung zum Meßkondensator.

Trotz dieser Maßnahme, die sich nach langem Probieren als am günstigsten erwies, war es nicht möglich, die Induktivitäten völlig abzugleichen, da C_v und C_m in ihrer Form stark voneinander verschieden sind. C_m besteht aus zwei parallel geschalteten Kondensatoren für Grob- und Feinregulierung, C_v aus einem geometrisch einfach gebauten Plattenkondensator (Fig. 2). Es wurden daher die oben erwähnten Einflüsse durch Vergleich der beiden Kondensatoren bei verschiedenen Kapazitäten und Frequenzen experimentell bestimmt und in den Eichkurven der Figur 8 dargestellt. Eine wesentliche

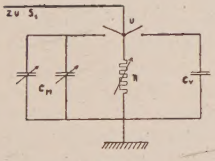

Fig. 7.

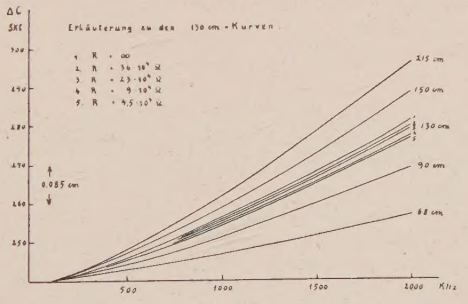

Fig. 8.

Verkleinerung der Korrektionen erzielt man vorher noch durch einen Kunstgriff. Der Flüssigkeitswiderstand R wurde aus dem Meßteil entfernt und direkt an die Mitte des Umschalters U gelegt (Fig. 7). Dadurch wurde erreicht, daß die ebenfalls frequenzabhängige Zusatzkapazität des Widerstandes und die Selbstinduktion seiner Zuleitungen auf den Meßteil sowohl als auch auf den Versuchsteil in gleicher Weise wirkte und somit bei der Messung nicht in Erscheinung trat. Die weiteren Korrektionen, die durch die gestaltsabhängigen Kapazitätsänderungen des Flüssigkeitswiderstandes bedingt sind (durch Zusammenpressen), sind nur an der Kurve für 130 cm Kapazität für verschiedene Werte des Flüssigkeitswiderstandes eingezeichnet, da sie für sämtliche Kapa-

zitätswerte gleich sind. Man sieht, daß diese Korrektionen von geringerer Größenordnung sind, als die Korrektionen durch den Zuleitungseffekt.

Um die Größe des Dämpfungswiderstandes zu bestimmen, mußte der Schlauch des Flüssigkeitswiderstandes möglichst weit zugedreht werden, während er parallel zu C_v lag. Der Widerstand war in diesem Falle praktisch gleich unendlich. Zur Kenntnis des Dämpfungswiderstandes genügte dann also die Messung des Widerstandes nur in dem Falle, wo er parallel zu C_m lag.

Es wäre möglich, daß bei dem Zuleitungseffekt auch ein Skineffekt eine Rolle spielt. Dies wurde daher gesondert untersucht. Hierzu wurden einige Leitungsstücke durch verschieden starke Cu- und Fe-Drähte, Messingrohre und Bänder ersetzt. Dabei wurde festgestellt, daß der Einfluß des Effekts, mit Ausnahme bei Eisen, nicht nennenswert war. Trotzdem wurden die Leitungen, soweit es möglich war, aus etwa 15 mm breiten geflochtenen Bändern hergestellt, die aus einzelnen 1 mm breiten Lamettabändchen bestanden.

Die Messung des Widerstandes wurde mit einer Wechselstrommeßbrücke vorgenommen. Den Wechselstrom hierzu lieferte ein Saitensummer S über einen Transformator. Besonders schwierig gestaltete sich die Messung von hohen Widerständen, da in diesem Falle infolge des geringen Stromes, der durch die Widerstände fließt, das Tonminimum stark abgeflacht und so eine genaue Messung unmöglich wird. Die Schärfe des Tonminimums konnte jedoch

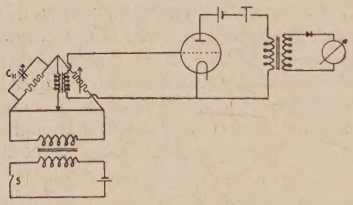

Fig. 9.

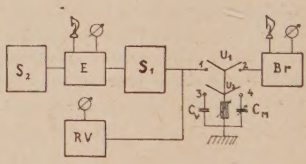

Fig. 10.

bedeutend vergrößert werden durch einen Drehkondensator, der parallel zu dem festen Vergleichswiderstand in der Brückenanordnung lag, und die von der Größe des Flüssigkeitswiderstandes abhängige Kapazität kompensierte. Der Brückenstrom wurde mit einem Niederfrequenzverstärker verstärkt und in einem Lautsprecher hörbar gemacht. Außerdem war noch vorgesehen, durch einen Transformator einen Teil des Stromes über einen Trockengleichrichter einem Zeigerinstrument zuzuführen und so das Minimum auch sichtbar zu machen. Figur 9 zeigt die Meßanordnung für den Flüssigkeitswiderstand. Das schematische Bild der gesamten Apparatur ist in Fig. 10 dargestellt.

Gang der Messung.

Nachdem die Apparate einige Zeit eingeschaltet und die Versuchsbedingungen, wie Spannung der Akkumulatoren, Temperaturen der Röhren usw. konstant geworden sind, kann mit der Messung begonnen werden. Zuerst wird für den Versuchskondensator C_v bei geschlossenem Kontakt 3 (Fig. 10) durch Regulieren am Sender S_2 auf Schwebungsfreiheit eingestellt. Sodann wird der Umschalter U_2 auf Kontakt 4 gelegt und die Gleichheit der Amplituden durch Veränderung des Flüssigkeitswiderstandes mit Hilfe des

Röhrenvoltmeters RV wieder hergestellt. Die nun nicht mehr vorhandene Schwebungsfreiheit wird mit dem Feinregulierkondensator im Meßteil wieder hergestellt und die neue Einstellung auf der Skala abgelesen. Zur Messung des Dämpfungswiderstandes wird der Umschalter U_2 so gestellt, daß keiner der beiden Kontakte geschlossen ist, und der Umschalter U_1 auf Kontakt 2 gelegt. Dadurch wird bewirkt, daß der Flüssigkeitswiderstand von der Hochfrequenzapparatur abgelegt und an die Meßbrücke angeschlossen ist. Ist dabei das mit dem Schleifkontakt zu suchende Ton- bzw. Stromminimum zu unscharf, so muß es durch Regulierung an dem Drehkondensator C_k (Fig. 9) noch besser herausgearbeitet werden. Ist dies geschehen, und sind alle erforderlichen Werte abgelesen, so sind alle Daten für eine Frequenz ermittelt und man kann auf eine andere Frequenz übergehen.

Es kann nun vorkommen, daß durch langsames Entladen eines Akkumulators oder durch mechanische Bewegung von einzelnen Elementen der Apparatur infolge von Schwankungen der Zimmertemperatur oder dergleichen ein Gang in den Meßresultaten hervorgerufen wird, der zu falschen Schlüssen über das Verhalten der DK Anlaß gibt. Am Schluß jeder etwa zwei Stunden in Anspurch nehmenden Meßreihe wurde daher zur Kontrolle der Konstanz der ganzen Anordnung eine Wiederholung der Messung bei der Anfangsfrequenz durchgeführt. Nur die Versuchsreihen, die hierbei eine vollkommene Uebereinstimmung lieferten, fanden bei der endgültigen Auswertung der Messungen Verwendung.

Zu große Schwingungsintensität des Senders S_1 bringt zwei Gefahren mit sich: 1. wird dann der Sender S_1 den aus technischen Gründen mit geringer Intensität arbeitenden Sender S_2 mitnehmen und dadurch die Resultate unbrauchbar machen. 2. kann der Flüssigkeitswiderstand eine zu große Erwärmung erleiden. Die ohnehin bei kleiner Belastung auftretende Erwärmung machte es bisweilen erforderlich, bis zur endgültigen Einstellung der Temperatur bei jedem Meßpunkt bis zu 2 Minuten zu warten, was störend auf die ganze Messung wirkte. Aus diesen Gründen wurde bei einer Amplitude von nur etwa 6 Volt gearbeitet. Das genügte für die Durchführung der Messung bei weitem und war mit einer Anodenspannung von 25 Volt bequem zu erreichen. Der Sender S_2 und das Röhrenvoltmeter arbeiteten mit der gleichen Spannung und der gleichen Batterie. Diese war so groß, daß etwa auftretende Schwankungen in der Belastung, die normal insgesamt ungefähr 15 MA betrug, nichts ausmachten. Um irgendwelche Handkapazitäten zu vermeiden, waren sämtliche Leitungen, die aus den Blechkästen zu den Batterien führten, über Blockkondensatoren geerdet.

Meßergebnisse.

Im folgenden sind die Meßergebnisse dargestellt (Fig. 11—18). Zur Ergänzung der Hochfrequenzmessungen wurden noch Messungen mit der Seibt'schen Kapazitätsmeßbrücke bei Tonfrequenz angestellt. Die so ermittelten ε-Werte wurden der statischen DK gleichgesetzt. Ist C_ε die Kapazität des gefüllten Versuchskondensators und C_l die des leeren, so ergibt sich für die DK der Wert

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon}{C_l}$$

C_l wurde aus der für einen Kreisplattenkondensator gültigen Näherungsformel

$$C = \frac{f}{4\pi d}$$

ermittelt.

Darin ist d der Abstand der beiden und f die Fläche einer Platte. Dieses Verfahren bietet keine große Genauigkeit der Bestimmung des absoluten Betrages von ε, da die Dicke der Substanz nicht genügend genau gemessen werden kann und man bei dickeren Substanzen die Randwirkung des Kondensators berücksichtigen müßte. Dies würde jedoch nur noch eine kleine Korrektion des absoluten Betrages von ε und damit eine kleine Verschiebung der Dispersionskurven verursachen. Für den Verlauf und die Form der Kurven ist keine wesentliche Aenderung zu erwarten, wie aus folgender Abschätzung hervorgeht. In Skalenteilen des Kondensators der Figur 3 beträgt der

Fehler beim Einstellen auf Schwebungsfreiheit	$\pm$ 0,2 Skt.
Ablesefehler am Kondensator	$\pm$ 0,3 Skt.
Fehler durch den Flüssigkeitswiderstand (Erwärmungseffekt); Ablesefehler aus den Korrektionskurven der Figur 8	$\pm$ 0,5 Skt.
Maximaler Gesamtfehler	$\pm$ 1,0 Skt.

Der maximale Fehler in der relativen Kapazitätsmessung beträgt somit (nach Seite 6) etwa 0,0085 cm für einen Punkt der Kurve. Im Mittel dürften die Abweichungen höchstens 0,05 cm betragen. Der prozentuale Fehler hängt von der Größe von C_v ab. Wenn wir einen Wert von 30 cm für den leeren Kondensator C_v zu Grunde legen, so ergibt sich bei einer DK von 5 der prozentuale Fehler zu etwa 0,03 %.

Ueberstieg die Kapazitätsänderung den etwa 0,9 cm betragenden Meßbereich des Feinkondensators, so fand folgendes Verfahren Anwendung: Zunächst wurde der Feinkondensator so weit benutzt, wie es der Meßbereich gestattete. Hierauf wurde er auf seine Anfangsstellung zurückgebracht und die Kapazitätsänderung am Grobkondensator kompensiert, was durch Beobachtung der Schwebungsfreiheit genügend genau gemacht werden konnte. Die gesamte Genauigkeit wird dabei jedoch etwas geringer. Bei einem solchen Umschalten dürfte der zusätzliche Fehler etwa 0,5 Skt. betragen. Die Genauigkeit der Widerstandsmessung hängt ab von der Größe des zu messenden Widerstandes. Sie ist bei kleineren Widerständen (Größenordnung 50 000 Ohm) größer und dürfte zwischen 1% und 5% liegen.

Als Abszissen sind in den folgenden Figuren die Frequenzen

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

aufgetragen, als Ordinaten die Skalenteile des Meßkondensators oder die errechnete DK. Zur Darstellung der Dämpfung könnte man als Ordinaten lediglich die Widerstände in Ohm auftragen, die zur Kompensation der Leitfähigkeit, d. h. zur Abgleichung der Amplituden erforderlich waren. Es ist jedoch für die Technik interessanter zu wissen, wie sich der Verlustwinkel δ bzw. $\mathrm{tg}\delta$ verhält. Es wurden daher die Widerstandswerte in die Formel

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{1}{\omega R C}$$

eingesetzt und daraus die entsprechenden Kurven ermittelt.

Zuerst wurde Kautschuk mit verschiedener Vorbehandlung untersucht. Die Metallgesellschaft[6]) in Frankfurt a. M. stellte uns freundlichst folgende Präparate zu diesem Zweck zur Verfügung. A) reiner Crepekautschuk, eine zähe, klebrige durchscheinende Substanz. B) eine Mischung von 100 Teilen A) mit 35 Teilen Schwefel. Diese Substanz ist ebenfalls zäh, jedoch gelblich und

[6]) Herrn Dr. Miedel von der Metallgesellschaft sei an dieser Stelle für die freundliche Vermittlung der Proben herzlichst gedankt.

nicht ganz so klebrig wie A). C) ist die gleiche Masse, aber unter Druck und einer Erhitzung auf 150° vulkanisiert. Diese Substanz ist der bekannte Hartgummi. D) ist das gleiche Produkt wie B), nur ungenügend vulkanisiert. Diese Probe ist noch leicht biegsam, aber nicht mehr plastisch wie A) und B). Es zeigte sich, daß der Widerstand der nicht erhitzten Substanzen A) und B) höher war als bei C) und D), der tg δ liegt tiefer (Fig. 11). Offenbar wirkt eine Erhitzung ungünstig auf die Isolierfähigkeit, die wohl mit zunehmender

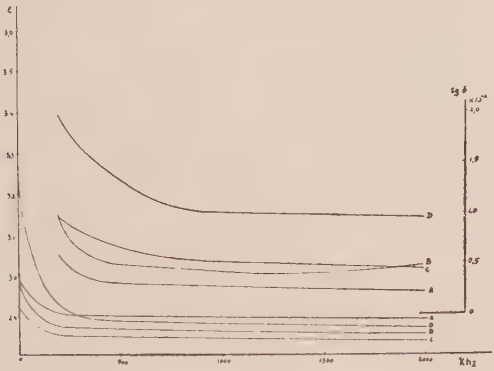

Fig. 11.

Vulkanisation durch ein Minimum geht. Die „totale" Dispersion ist für D) am größten und die prozentuale Aenderung der DK von $\nu = 0$ auf $\nu = 2 \cdot 10^6$ beträgt etwa 11,5 %. Für A) ist sie mit 3,7 % am kleinsten.

Bei Erwärmung tritt eine wesentliche Verschlechterung der dielektrischen Eigenschaften ein (Fig. 12). Der Widerstand sinkt für C) und D) stark ab,

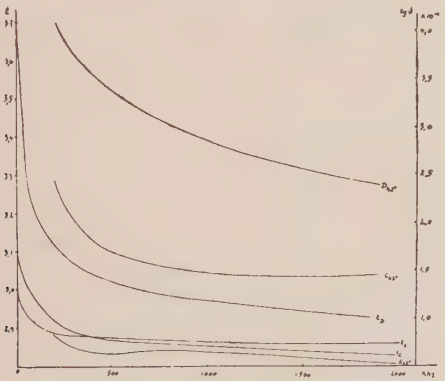

Fig. 12.

während er für A) merkwürdigerweise zunimmt; tg δ nimmt jedoch für alle Substanzen bedeutend zu. Die Dispersionen erfahren ebenfalls eine Vergrößerung. Die Kurve für C) ist trotz mehrmaligen Erhitzens auf 75° gut reproduzierbar, ein Zeichen dafür, daß bei dieser Temperatur keine inneren

chemischen Umsetzungen in Gestalt von Vulkanisation stattgefunden haben. Die Probe D) wurde, um auch hieran den Einfluß der Vulkanisation zu untersuchen, 30 Stunden auf 75 ° erhitzt. Es ergab sich, daß dadurch die Kurve nur parallel nach höheren ε-Werten verschoben wurde. Es scheint, als

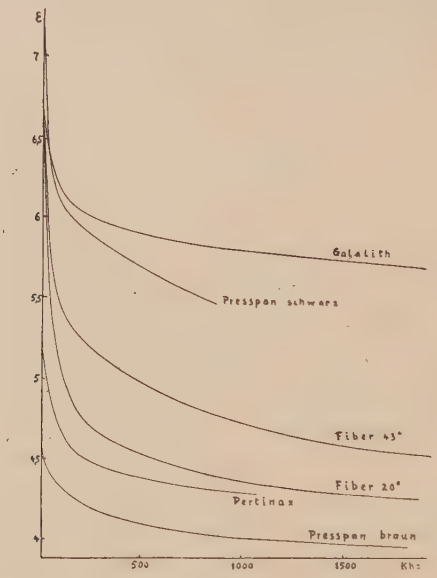

Fig. 13.

ob bei dieser Temperatur auch für eine vorvulkanisierte Substanz keine Vulkanisation mehr stattgefunden hat, und die Verschiebung nur auf eine Gestaltsänderung bei dieser Behandlung zurückzuführen ist.

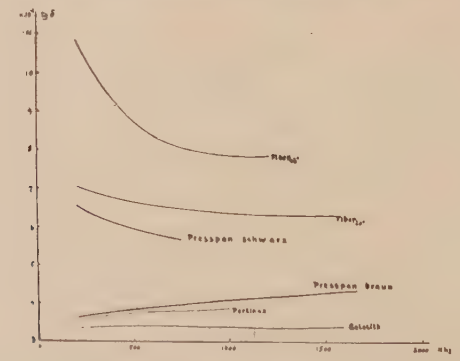

Fig. 14.

Figur 13 zeigt die ε-Kurven für Galalith, Pertinax, schwarzen und braunen Presspan und rote Vulkanfiber, letztere bei 20 ° und 43 °. In Figur 14 sind die dazu gehörigen tgδ-Kurven aufgezeichnet. Für Vulkanfiber fällt

die DK. um nahezu 30 % vom statischen Wert auf den bei $2 \cdot 10^6$ Hz. Bei Pertinax wird die Leitfähigkeit so groß, daß die Meßreihe bei 10^6 Hz abgebrochen werden mußte, da der Widerstand an dieser Stelle nur noch 15 000 Ohm betrug. Noch kleinere Widerstände zu kompensieren war nicht möglich, da der Flüssigkeitswiderstand sich nicht weiter verkleinern ließ.

Einen sehr starken Abfall der DK (23 %) hat auch schwarzer Presspan. Auch hier muß der starken Leitfähigkeit wegen die Meßreihe vorzeitig abgebrochen werden.

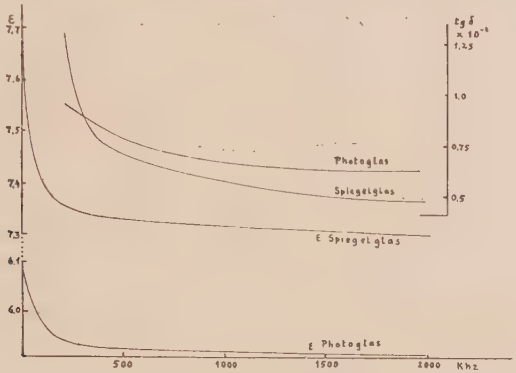

Fig. 15.

Bei braunem Presspan ist der Abfall der DK wesentlich geringer als bei schwarzem, nämlich nur 13 %. Der Unterschied rührt vielleicht von stark leitenden Farbteilchen her. Der Abfall bei Photoplattenglas (Fig. 15) beträgt nur etwa 2,1 %. Bei Spiegelglas fällt die DK um etwa 4,2 % ab. Außer diesen Gläsern wurde noch Minoskondensatorglas untersucht. Hierbei wurde fast keine Dispersion und Leitfähigkeit gemessen.

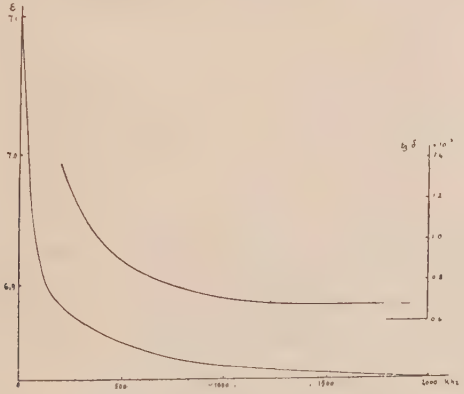

Fig. 16.

Für die Messung an reinstem Berylloxyd stand ein Tiegel aus diesem Material zur Verfügung. Der Tiegel hing in einem Gefäß mit Hg, ebenso befand sich im Innern als zweiter Kondensatorbelag Hg. An dem Material wurden wie an Minosglas fast keine Dispersion und Leitfähigkeit beobachtet.

Einen relativ geringen Abfall der DK von 3,8 % hat auch Schalttafelmarmor (Fig. 16).

Es wurde nun der Versuch gemacht, ein Dielektrikum mit geringer Dispersion und Dämpfung durch einen Leiter zu verunreinigen, um festzustellen, ob und wie leitende Verunreinigungen auf die DK und die Dispersion eines Materials einwirken. Als Prototyp eines „guten" Dielektrikums galt Schwefelblüte, denn hierbei wurde fast keine Frequenzabhängigkeit der DK und keine meßbare Leitfähigkeit festgestellt.

Als leitende Verunreinigung wurde reiner Ruß verwendet. Dem Schwefel wurde zuerst 0,5 Gewichtsprozent Ruß beigefügt und das Gemisch in einer Reibschale gut vermengt. Daraus ergab sich ein einigermaßen homogenes Gemisch, welches zwischen den Platten des Versuchskondensators etwas

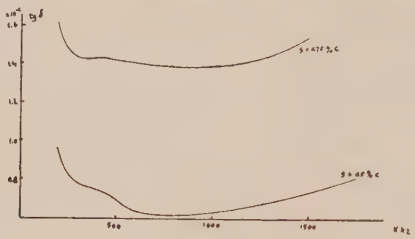

Fig. 17.

gepreßt wurde. Die Dispersions- und tgδ-Kurve ist in Figur 17 und 18 für zwei verschiedene Gemische dargestellt. Man ersieht daraus, daß die DK abfällt mit wachsender Frequenz, und zwar für Schwefel mit 0,5 Gewichtsprozent Rußzusatz um 5,5 % und bei 0,75 Gewichtsprozent Ruß um 8,5 %.

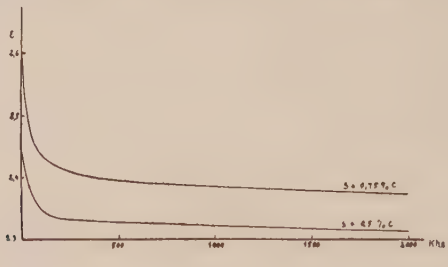

Fig. 18.

Es ist ferner zu sehen, daß die Beimengung einer leitfähigen Substanz eine mit dem Prozentgehalt der Verunreinigung steigende Dispersion verursacht. Ebenso steigt der zahlenmäßige Wert der DK mit dem Grad der Leitfähigkeit, um bei vollkommener Leitfähigkeit den Wert unendlich zu haben, da man ja einem Leiter eine unendlich große DK zuordnet. Der Befund an den Gemischen steht im Einklang mit den Messungen von Smyth und Hitchcock[7]).

Diskussion der Ergebnisse.

Man hat zur Erklärung des Verhaltens der DK und der Dämpfung verschiedene Theorien aufgestellt. Nach K. W. Wagner[8]) kann man sich in das Dielektrikum mehr oder weniger große Gebilde eingelagert denken, die Leit-

[7]) C. P. Smyth u. C. S. Hitchcock, Journ. Am. Chem. Soc. **54**, 4631, 1932.
[8]) K. W. Wagner, Ann. d. Physik. **40**, 817, 1913.

fähigkeit besitzen. Wenn an ein solches Medium ein elektrisches Feld angelegt wird, so werden die elektrischen Ladungen in diesen Gebilden höherer Leitfähigkeit sich trennen (sie werden als induzierte Ladungen anzusprechen sein und in Richtung der Feldlinien auseinandergehen). Beim Anlegen eines Wechselfeldes werden diese Ladungen oszillieren und innerhalb der leitfähigen Gebilde einen Wechselstrom verursachen, der als Folge eine Erwärmung hat, die als dielektrischer Verlust in Erscheinung tritt. Nach den Versuchen, die in dieser Richtung von Wagner u. a.[9]) gemacht worden sind, ist diese Theorie im wesentlichen nur auf niedrige Frequenzen anwendbar. Anders hingegen bei der Dipoltheorie von Debye[10]). Debye nimmt in der betreffenden Substanz fertige Dipole an, die sich unter dem Einfluß eines Feldes richten bzw. oszillieren können. Er kommt zu einer Formel:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \frac{(\varepsilon_0 + 2)^2}{(\varepsilon_0 - 2)^2}\,\omega^2\tau^2}$$

Hierin bedeutet ε_0 die statische DK, ε_∞ die optische DK, ω die Kreisfrequenz $2\pi\nu$ und τ die Relaxationszeit, das ist die Zeit, in der alle Dipole in ihren ursprünglichen Zustand der Unordnung zurückgekommen sind. In Tabelle 2 sind aus den vorhandenen Kurven die τ-Werte für die gemessenen

Tabelle 2.

Material		$\tau \cdot 10^6$	Material		$\tau \cdot 10^6$
Gummi	A	2,205	Galalith		1,29
„	B	2,570	Vulkanfiber	20°	1,138
„	C	1,068	Vulkanfiber	43°	1,005
„	D	1,698	Pertinax		2,544
„	A_{33}	1,671	Presspan schwarz		1,342
„	C_{62}	1,126	Spiegelglas		2,080
„	D_{42}	1,353	S + 0,5 % C		2,058
Marmor		2,225	S + 0,75 % C		1,944
Photoglas		0,856			

Substanzen ausgerechnet und eingetragen. Nun ist aber diese Theorie unter der Voraussetzung aufgestellt, daß die Dipole in einer Flüssigkeit, die selbst kein Dipolmoment hat, nur in geringer Zahl vorhanden sind. Ein solches Dielektrikum ist eine schwach konzentrierte Lösung. Die Größe τ hängt nach der Dipoltheorie mit ξ, der molekularen Reibungskonstanten, durch folgende Beziehungen zusammen:

$$\tau = \frac{\xi}{2\,k\,T}$$

Hierin ist k die Boltzmann'sche Konstante, T die Temperatur. Nun soll aber ξ seinerseits mit der Zähigkeitskonstanten η und dem Molekülradius a in folgender Beziehung stehen:

$$\xi = 8\,\pi\,\eta\,a^3$$

Woraus sich für τ ergibt:

$$\tau = \frac{4\,\pi\,\eta\,a^3}{k\,T}$$

Diese Voraussetzungen gelten aber nur, wenn die makroskopisch gemessene

9) P. W. Grover, Bull. Bur. of Stand. **7**, 495, 1911.
Flemming u. Dyke, Journ. of the Inst. of. El. Engin. **49**, 323, 1912.
10) P. Debye. Polare Molekeln.
P. Debye. Verh. d. D. Phys. Ges. —, 777, 1913.

Zähigkeit auf Molekülverhältnisse, also bei kugelförmigen Molekülen, anwendbar ist. Dies ist aber bei den komplizierten Stoffen, wie sie in der Technik als Isolatoren verwandt werden, kaum der Fall. Drude[11]) findet in seinen Berechnungen über die anomale elektrische Dispersion eine Größe A, die als Reibungswiderstand in der Bewegungsgleichung des Elektrons auftritt. Schrödinger[12]) kommt in seiner Betrachtung über die Debye'sche und Drude'sche Theorie zu der Ueberzeugung, daß die Gleichung für n^2 bei Drude und für ε bei Debye formal übereinstimmen, ebenso stimmen A und τ in der Dimension und Größenordnung überein. Inwieweit die Relaxationszeit τ^w der Wagner'schen Theorie mit den entsprechenden Werten von Deby oder von Drude vergleichbar ist, kann aus der Form der gemessenen Kurven prinzipiell nicht ermittelt werden.

In dieser Hinsicht kann vielleicht die Fortsetzung der Versuche an dem oben erwähnten Schwefel-Ruß-Gemisch Klarheit bringen. Es wäre zu untersuchen, wieweit sich die Dipolanteile an der Dispersion absondern lassen, was durch die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der DK möglich scheint. Auf der anderen Seite müßte durch mikroskopische Untersuchung und Variation der Anzahl und Größe der in das Dielektrikum eingebetteten Leiter versucht werden, einen Vergleich der Drude'schen und Wagner'schen Theorie der elektrischen Dispersion zu finden.

Zusammenfassung.

In der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Meßanordnung gezeigt, die es gestattet, kleine Aenderungen der Kapazität und der Leitfähigkeit eines mit Verlusten behafteten Kondensators zu messen. Die Messungen wurden an verschiedenen technischen Isolierstoffen in dem Frequenzbereich von 150 bis 2000 Khz ausgeführt. Außerdem wurde noch der Wert für ε bei Tonfrequenz (600 Hz) ermittelt und der statischen DK gleichgesetzt. Bei sämtlichen Kurven war ein stetiger Abfall der DK vom statischen Wert auf den bei 2000 Khz zu finden. Ebenso verhielt sich der tg δ[13]). Die von anderen Forschern gefundenen Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Kurven für die DK und den Widerstand dürften also ausnahmslos auf Meßfehler dieser Autoren zurückzuführen sein. Sollten derartige Unregelmäßigkeiten in den DK-Kurven vorhanden sein, so können sie höchstens zwischen 0 und 10^5 Hz auftreten, ein Bereich, der in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht wurde. Quantitativ ergab sich, daß die prozentualen Aenderungen zwischen den von Kühlewein und Weber angegebenen Werten lagen. Ein kurzer Vergleich der Theorien von Wagner, Debye und Drude an Hand der Kurven führte wegen der Kompliziertheit des inneren Aufbaues der untersuchten Substanzen zu keinem Ergebnis. Es wurde daher darauf hingewiesen, daß vielleicht die Fortsetzung der Untersuchungen an Modellsubstanzen (Schwefel-Ruß-Gemisch) zur Erklärung des Verhaltens der festen Dielektrika bei verschiedenen Frequenzen beitragen kann.

Vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom Sommer-Semester 1932 bis zum Sommer-Semester 1934 am Physikalischen Institut der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität zu Frankfurt a. M. ausgeführt. Herrn Geheimrat Prof. Dr. R. Wachsmuth und Herrn Professor Dr. K. W. Meißner statte ich hiermit meinen herzlichen Dank ab für die dauernde Förderung und das Interesse an der Arbeit. Besonderen Dank schulde ich Herrn Dr. W. Graffunder, der mir stets anregend mit Rat und Tat zur Seite stand.

11) P. Drude, Wied. Ann. **64**, 131, 1898.
12) E. Schrödinger, Verh. d. D. Ph. Ges. —, 1167, 1913.
13) Die Maxima in Fig. 18 können durch Kristalle in dem Gemisch verursacht worden sein.

Lebenslauf.

Am 17. Januar 1911 wurde ich zu Frankfurt am Main als Sohn des jetzigen Revierförsters i. R. Heinrich Scheuer und dessen Ehefrau Marie, geb. Schäflein, geboren. Nach 12jährigem Besuch der Sachsenhäuser Oberrealschule zu Frankfurt am Main bestand ich daselbst Ostern 1929 die Reifeprüfung.

Anschließend studierte ich mit Ausnahme des Sommersemesters 1930, das ich an der Universität München verbrachte, an der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main. Meine Fächer waren Experimentalphysik, theoretische Physik, angewandte Physik und Mineralogie. Ende 1934 kamen die experimentellen Arbeiten dieser Dissertation zum Abschluß, während die Auswertung der Ergebnisse und einzelne Rechnungen noch etwa ein weiteres Jahr in Anspruch nahmen.

Franz Scheuer.

F. K. SUSSNER, Buchdruckerei, Neu-Isenburg